

**В. М. ПОЛЕЩУК, В. Л. БРОВКИН****МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ СЛИТКА  
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КАНАЛЕ КРИВОЛИНЕЙНОЙ МНЛЗ**

Выполнен анализ известных физических моделей процесса деформации слитка. Показано, что отдельные элементы физических моделей, введенные как допущения и упрощения, противоречат принципиальным положениям теории механики сплошных сред. Известные аналитические методы расчета ключевых параметров машины непрерывного литья заготовок недостаточно совершенны, а эмпирические зависимости также не дают желаемого результата, так как они эффективны только в случае тиражирования объекта конструирования. На базе современных представлений о процессе пластической деформации непрерывного слитка на машине непрерывного литья заготовок разработана физическая модель процесса. Сформулированы базовые положения, характеризующие предлагаемую модель процесса разгиба непрерывнолитого слитка. Основным элементом предлагаемой физической модели является температурный интервал хрупкости. Предложен алгоритм расчета оптимальной траектории технологической оси криволинейной машины непрерывного литья заготовок. Алгоритм включает в себя 3 этапа: 1) теплотехнические расчеты для определения положения низкотемпературной и высокотемпературной границ температурного интервала хрупкости; 2) расчеты положения реперных точек траектории разгиба на поверхности слитка; 3) расчеты радиусов кривизны на границах расчетных участков. При конструировании физической модели учитывались следующие положения: а) режим деформации исключает нарушение сплошности слитка; б) параметры режима деформации должны обеспечивать полное использование ресурса пластичности материала слитка в критических зонах. Предложены конечные расчетные выражения для определения радиуса кривизны слитка в процессе разгиба. В результате расчета определяется кривая разгиба слитка и протяженность технологической оси машины непрерывного литья заготовок. Сформулированы выводы по результатам работы: предложена физическая модель процесса разгиба слитка на криволинейных машинах непрерывного литья заготовок, которая позволяет повысить точность и надежность результатов моделирования; разработан алгоритм расчета оптимальной траектории технологической оси криволинейной машины непрерывного литья заготовок.

**Ключевые слова:** непрерывное литье, МНЛЗ, слиток, разгиб, физическая модель, деформация, температурный интервал хрупкости.

**В. М. ПОЛЕЩУК, В. Л. БРОВКІН****МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМАЦІЇ ЗЛИТКА В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ КАНАЛІ  
КРИВОЛІНІЙНОЇ МНЛЗ**

Виконано аналіз відомих фізичних моделей процесу деформації злитка. Показано, що окремі елементи фізичних моделей, введені як допущення і спрощення, суперечать принципам положенням теорії механіки суцільних середовищ. Відомі аналітичні методи розрахунку ключових параметрів машини безперервного лиття заготовок недостатньо досконалі, а емпіричні залежності також не дають бажаного результату, так як вони ефективні тільки в разі тиражування об'єкта конструювання. На базі сучасних уявлень про процес пластичної деформації безперервного злитка на машині безперервного лиття заготовок розроблена фізична модель процесу. Сформульовані базові положення, що характеризують запропоновану модель процесу розгинання безперервнолитого злитка. Основним елементом запропонованої фізичної моделі є температурний інтервал крихкості. Запропонований алгоритм розрахунку оптимальної траєкторії технологічної осі криволінійної машини безперервного лиття заготовок. Алгоритм включає в себе 3 етапи: 1) теплотехнічні розрахунки для визначення положення низькотемпературного та виськотемпературного кордонів температурного інтервала крихкості; 2) розрахунки положення реперних точок траєкторії розгинання на поверхні злитка; 3) розрахунки радіусів кривизни на кордонах розрахункових ділянок. При конструюванні фізичної моделі враховувалися наступні положення: а) режим деформації виключає порушення суцільності злитка; б) параметри режиму деформації повинні забезпечувати повне використання ресурсу пластичності матеріалу злитка в критичних зонах. Запропоновані кінцеві розрахункові вирази для визначення радіуса кривизни злитка в процесі розгинання. В результаті розрахунку визначається крива розгинання зливка і протяжність технологічної осі машини безперервного лиття заготовок. Сформульовані висновки за підсумками роботи: запропонована фізична модель процесу розгинання зливка на криволінійних машинах безперервного лиття заготовок, яка дозволяє підвищити точність і надійність результатів моделювання; розроблений алгоритм розрахунку оптимальної траєкторії технологічної осі криволінійної машини безперервного лиття заготовок.

**Ключові слова:** безперервне лиття, МНЛЗ, злиток, розгин, фізична модель, деформация, температурний інтервал крихкості.

**V. M. POLYESHCHUK, V. L. BROVKIN****MODELING THE PROCESS OF DEFORMATION OF THE INGOT IN THE TECHNOLOGICAL  
CHANNEL OF THE CURVILINEAR CCM**

The analysis of known physical models of the ingot deformation process is performed. It is shown that individual elements of physical models, introduced as assumptions and simplifications, contradict the fundamental principles of the theory of continuum mechanics. The well-known analytical methods for calculating the key parameters of the continuous casting machine are not perfect enough, and the empirical dependencies also do not give the desired result, since they are effective only in the case of replication of the construction object. On the basis of modern ideas about the process of plastic deformation of a continuous ingot, a physical model of the process has been developed at the continuous casting machine. Basic provisions are formulated that characterize the proposed model of the process of unbending a continuously cast ingot. The main element of the proposed physical model is the temperature range of fragility. An algorithm is proposed for calculating the optimal trajectory of the technological axis of a curvilinear caster. The algorithm includes 3 stages: 1) heat engineering calculations for determining the position of the low-temperature and high-temperature boundaries of the temperature range of fragility; 2) calculations of the position of the reference points of the bend trajectory on the ingot surface; 3) calculations of the radii of curvature at the boundaries of the calculated areas. When constructing a physical model, the following provisions were taken into account: a) the deformation mode eliminates the discontinuity of the ingot; b) the parameters of the deformation mode should ensure the full utilization of the resource of plasticity of the ingot material in critical zones. Finite design expressions are proposed for determining the ingot radius of curvature during the bending process. As a result of the calculation, the ingot bending curve and the length of the technological caster axis are determined. Conclusions based on the results of the work are formulated: a physical model of the ingot bending process on curvilinear continuous casting machine is proposed, which allows improving the accuracy and reliability of the simulation results; an algorithm has been developed for calculating the optimal trajectory of the technological axis of a curvature caster.

**Keywords:** continuous casting, continuous casting machine, ingot, unbending, physical model, deformation, temperature range of brittleness.

**Введение.** Успешные машиностроительные фирмы заинтересованы в поддержании на должном уровне темпов технического прогресса, основа которых новые знания и более совершенные модели процесса. Для криволинейных машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с точки зрения качества готовой продукции и эффективности производства критическими являются криволинейные участки технологической линии, где слиток с незакристаллизовавшейся сердцевинкой подвергается деформации изгиба.

За более чем 40 лет исследования процесса деформации непрерывнолитого слитка в двухфазном состоянии наукой и практикой накоплены многочисленные сведения о природе явлений, сопровождающих процессы изгиба слитка в технологической линии МНЛЗ.

На базе этих сведений были предложены различные физические модели процесса деформации слитка, которые, в разной степени приближения, отражали явления, сопровождающие реальный процесс [1–6]. Параллельно совершенствовались знания, касающиеся параметров и механизмов взаимодействия элементов физических моделей процессов загиба и разгиба непрерывнолитого слитка.

Ранее, в работе [1] были подвергнуты детальному анализу некоторые принципиальные допущения и упрощения, которые использованы в наиболее известных моделях процесса разгиба (загиба) непрерывнолитых слитков в криволинейных МНЛЗ. Было показано, что отдельные элементы физических моделей, введенные как допущения и упрощения, противоречат принципиальным положениям теории механики сплошных сред и, в связи с этим, искажают конечные результаты аналитических исследований. В одних случаях (кусочно–точечные модели) не учтено, что показатель относительной деформации в интерпретации Коши не обладает свойством аддитивности. В других случаях (послойно–линейные модели) суммарный показатель за весь процесс изгиба относительной деформации определяется как сумма деформаций различных материальных частиц, расположенных вдоль линии температурного интервала хрупкости (ТИХ) от начала и до конца процесса деформации слитка, в то время как теория механики сплошных сред разрешает суммирование деформации исследуемой материальной частицы только вдоль ее траектории перемещения в пространстве.

Практика работы конструкторских бюро ведущих машиностроительных фирм СНГ подтверждает, что аналитические методы расчета ключевых параметров МНЛЗ недостаточно совершенны, и могут быть использованы только для интерпретации качественных проявлений технологического процесса [2].

Эмпирические зависимости также не дают желаемого результата, так как они эффективны только в случае тиражирования объекта конструирования.

Таким образом актуальность разработки более совершенных физических моделей и расчетных

методик подтверждается практикой работы конструкторских бюро машиностроительных фирм и результатами анализа публикаций по данной теме.

**Постановка задачи.** Целью настоящей работы является создание более совершенной физической модели и расчетных методик процесса деформации непрерывнолитого слитка на криволинейных участках технологической оси МНЛЗ.

Предлагаемая ниже физическая модель процесса разгиба (загиба) позволяет более корректно применять положения теории механики сплошных сред при разработке принципов ее функционирования.

Наличие модели, адекватно отражающей процесс деформации слитка на криволинейной МНЛЗ от кристаллизатора до момента порезки позволяет решить многие практические задачи [7–12], начиная от вопросов повышения производительности МНЛЗ и повышения качества слитка до вопросов рационального размещения (выставки) оборудования технологической линии МНЛЗ.

Физические модели процессов загиба и разгиба во многом идентичны и являются разновидностями одного вида деформации – изгиба. В дальнейшем для сокращения объема статьи рассмотрим построение физической модели деформации слитка только в зоне разгиба криволинейной МНЛЗ, как более сложной задачи.

Прежде всего отметим базовые положения, характеризующие предлагаемую модель процесса разгиба непрерывнолитого слитка.

1. При пластической деформации закристаллизовавшейся части слитка ее сплошность не нарушается при условии непревышения предельно допустимых значений относительной деформации в критических зонах тела слитка.

2. Критической зоной в закристаллизовавшейся части стального слитка является зона температурного интервала хрупкости (ТИХ), где способность металла пластически деформироваться минимальна.

3. Критическая зона в закристаллизовавшейся части тела слитка представляет собой слой, заключенный в пределах изотерм верхней и нижней границ ТИХ.

4. Положение критического слоя в теле слитка определяется, главным образом, теплофизическими свойствами металла и режимом охлаждения слитка.

5. В процессе перемещения слитка по траектории технологической оси МНЛЗ он охлаждается, и зона ТИХ перемещается от его поверхностных слоев к осевой линии.

6. Область существования технологии пластической деформации непрерывнолитого слитка с жидкой сердцевиной ограничивается предельными значениями допустимой величины относительной деформации металла слитка в зоне температурного интервала хрупкости (ТИХ).

7. На участках технологической линии МНЛЗ, где осуществляется непрерывная деформация слитка, величина относительной деформации аккумулируется (суммируется).

8. Величина деформации исследуемой материальной частицы в заданном интервале перемещения слитка по технологической оси МНЛЗ функционально связана с изменением ее радиуса кривизны в этом интервале. Положение материальной частицы в теле слитка однозначно характеризуется расстоянием от нейтральной оси слитка.

9. Для деформации изгиба характерна линейная схема напряженного состояния (сжатие–растяжение). В реальных условиях нарушение сплошности металлических тел при растяжении происходит при более низких величинах деформации, чем при сжатии. Поэтому необходимо и достаточно чтобы физическая модель отражала явления происходящие в зоне действия растягивающих напряжений.

10. Условно принимается, что все закономерности напряженно-деформированного состояния твердого тела сохраняются до изотермы солидус.

На рис. 1 представлено схематическое изображение участка разгиба криволинейной МНЛЗ в зоне действия растягивающих напряжений.

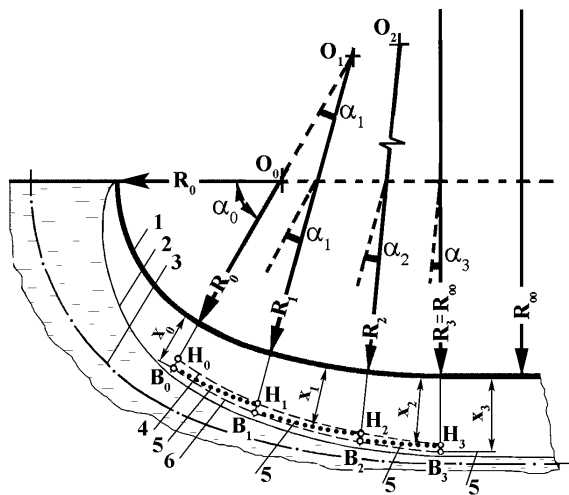


Рис. 1 – Схема участка разгиба криволинейной МНЛЗ: 1 – поверхность слитка; 2 – граница образования твердой окорочки; 3 – нейтральная линия; 4 – низкотемпературная изотерма ТИХ (система точек  $H_i$ ); 5 – линии  $x_i = \text{const}$  (между точками  $B_i$  и  $H_{i+1}$ ); 6 – высокотемпературная изотерма ТИХ (система точек  $B_i$ );  $x_i$  ( $x_0, x_1, x_2, x_3$ ) – расстояния от поверхности до точек  $B_i$  ( $H_{i+1}$ )

Зона исследуемого процесса разгиба (выпрямления) слитка ограничена слева плоскостью сопряжения радиальной части технологической оси МНЛЗ с криволинейной, а справа плоскостью сопряжения криволинейной траектории с горизонтальной частью слитка.

Основным элементом предлагаемой физической модели является температурный интервал хрупкости (ТИХ). Температурный интервал хрупкости сверху ограничен низкотемпературной изотермой 4, а снизу высокотемпературной изотермой 6. Поверхность слитка (кривая 1) в процессе разгиба изменяет свою кривизну с  $\frac{1}{R_0}$  до  $\frac{1}{R_i} = 0$ .

Положение линии солидус иллюстрирует кривая 2.

Нейтральная линия (кривая 3) расположена в середине высоты слитка и параллельна поверхности слитка.

Введем понятие "расчетный участок". Границами "i"-го участка являются низкотемпературная ( $H_{i-1} - H_i$ ) и высокотемпературная ( $B_{i-1} - B_i$ ) изотермы ТИХ и линии, совпадающие с векторами радиусов реперных точек  $R_{i-1}$  и  $R_i$ .

Реперная точка физической модели – точка на поверхности непрерывнолитого слитка, лежащая на пересечении линии поверхности слитка и линии радиуса кривизны в конце "i"-го расчетного участка, где исчерпывается ресурс пластичности выбранной материальной частицы.

В пределах первого участка  $H_0B_0 - H_1B_1$  все материальные частицы, располагающиеся на входе участка (линия  $H_0B_0$ ) перемещаются по траекториям, параллельным поверхности слитка, к низкотемпературной границе ТИХ (линия  $H_0H_1$ ). Из рис. 1 видно что наиболее протяженный путь в пределах зоны ТИХ проходит материальная частица расположенная в точке  $B_0$ . Это означает, что данная частица претерпевает деформацию растяжения по величине большую, чем любая другая частица первого расчетного участка.

**Алгоритм решения задачи.** Расчетная процедура включает в себя 3 этапа:

- теплотехнические расчеты для определения положения низко- и высокотемпературной границ ТИХ;
- расчеты положения реперных точек траектории разгиба на поверхности слитка;
- расчеты радиусов кривизны на границах расчетных участков.

Основываясь на сформулированных принципах построения физической модели перейдем к последовательным расчетным операциям при определении оптимального режима деформации слитка в процессе его выпрямления.

Ключевым исходным параметром для вычисления протяженности расчетного участка является максимальная продолжительность остывания закристаллизовавшегося металла в пределах слоя ТИХ. Существует несколько методик его расчета, не останавливаясь на которых примем, что эта величина известна  $\tau_{\text{охл}}^{\text{ТИХ}}$ .

По известным методикам рассчитываем также положение границ слоя ТИХ в плоскости сопряжения радиальной и криволинейной зон МНЛЗ.

Пример инженерного расчета траектории разгиба слитка для условий, проектируемых и существующих криволинейных МНЛЗ, основанный на предложенной методике, будет представлен в последующих публикациях.

В общем случае протяженность исследуемого слоя слитка, изогнутого по технологической оси криволинейной зоны МНЛЗ может быть определена так

$$l = \frac{v_{\text{разл}} \cdot \tau}{1 \pm \varepsilon}, \quad (1)$$

где  $v_{\text{разл}}$  – скорость разливки на МНЛЗ, м/с;

$\tau$  – длительность исследуемого процесса, с;

$\varepsilon$  – относительная деформация накопленная за исследуемый период времени.

Для нейтрального слоя деформируемого слитка, где относительная деформация  $\varepsilon = 0$ , длина расчетного участка будет

$$l_i^{\text{нейтр}} = v_{\text{разл}} \cdot \tau_{\text{охл},i}^{\text{тих}}. \quad (2)$$

Полагая, что центр кривизны в конце 1-го участка расположен на продолжении линии начального радиуса кривизны  $R_0$  и  $R_1$  угол сектора 1-го участка определится по формуле

$$\alpha_1 = \frac{l_1^{\text{нейтр}}}{R_1 + h}, \quad (3)$$

где  $h$  – половина толщина слитка, м.

Указанная привязка центра кривизны в конце первого участка к положению радиуса кривизны в его начале обусловлена необходимостью обеспечить плавное сопряжение кривизны предыдущего и последующего расчетных участков.

С учетом (3) протяженность искомого слоя в закристаллизовавшейся части слитка на расстоянии  $x_0$  от его поверхности будет равна

$$l_1 = \alpha_1 \cdot (R_1 + x_0) = l_1^{\text{нейтр}} \cdot \frac{R_1 + x_0}{R_1 + h}. \quad (4)$$

Следующим этапом расчета является определение радиуса кривизны  $R_1$  в конце первого расчетного участка. На этом этапе ключевым параметром является величина допустимой относительной деформации материальной частицы, имеющей наибольшую протяженность траектории в пределах зоны ТИХ. Ранее было определено, что такой материальной частицей является частица, расположенная на пересечении линии сопряжения радиальной и криволинейной зон с высокотемпературной границей ТИХ.

Конец ее траектории лежит на пересечении вектора радиуса кривизны  $R_1$  и низкотемпературной границы ТИХ. Сразу же отметим важную деталь схемы, а именно, расстояние от поверхности слитка до траектории выделенной материальной частицы есть величина постоянная, т.е. в пределах первого расчетного участка  $x_0 = \text{const}$ .

Полагаем, что при оценке режима деформации на каждом расчетном участке необходимо и достаточно сравнить величину суммарной деформации, которую претерпевает материальная частица на самом протяженном пути перемещения с предельно допустимой деформацией.

При конструировании физической модели исходим из следующих положений:

– режим деформации исключает нарушение сплошности слитка;

– параметры режима деформации должны обеспечивать полное использование ресурса пластичности материала слитка в критических зонах.

Первое условие гарантировано выполняется если в пределах расчетного участка величина аккумулированной деформации любой материальной частицы не превышает допустимой величины:

$$\sum \varepsilon_{\text{ТИХ}} < [\varepsilon]. \quad (5)$$

Второе условие выполняется при:

$$\sum \varepsilon_{\text{ТИХ}} = [\varepsilon]. \quad (6)$$

Суммируя сказанное запишем условие (6) в параметрах первого расчетного участка

$$[\varepsilon_1] = \frac{h-x_0}{R_0+x_0} - \frac{h-x_0}{R_1+x_0}. \quad (7)$$

Отсюда

$$R_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_0+x_0} - \frac{[\varepsilon_1]}{h-x_0}} - x_0 = \frac{R_0+x_0}{1-[\varepsilon_1] \frac{R_0+x_0}{h-x_0}} - x_0, \quad (8)$$

где  $x_0$  – расстояние от поверхности слитка до высокотемпературной границы ТИХ в начале 1-го расчетного участка;

$R_0$  – радиус кривизны поверхности слитка в начале 1-го расчетного участка;

$[\varepsilon_1]$  – предельно допустимая величина относительной деформации для слоя ТИХ первого участка.

Второй расчетный участок располагается непосредственно за первым. Поэтому конец первого участка является началом второго. По аналогии с первым участком наибольшая протяженность пути в зоне ТИХ и материальной частицы расположена в точке  $B_1$ . Траектория перемещения этой частицы  $B_1 N_2$ . Радиус кривизны поверхности слитка, в конце второго участка, который соответствует условиям (7):

$$R_2 = \frac{R_1+x_1}{1-[\varepsilon_2] \frac{R_1+x_1}{h-x_1}} - x_1, \quad (9)$$

Отметим важное качество предлагаемой физической модели. Модель позволяет решать задачу как в варианте однородной среды, где  $[\varepsilon] = \text{const}$  для всех расчетных участков, так и для неоднородной, где  $[\varepsilon_i] = \text{const}$  для каждого расчетного участка, но изменяется при переходе от одного расчетного участка к другому  $[\varepsilon_1] \neq [\varepsilon_2] \neq \dots [\varepsilon_i]$ .

Таким образом, предлагаемая физическая модель процесса деформации непрерывнолитого слитка позволяет корректно с соблюдением основных положений механики сплошных сред рассчитать оптимальную траекторию технологической оси МНЛЗ в криволинейной зоне.

Понятно, что для "i+1" расчетного участка радиус кривизны в конце участка:

$$R_{i+1} = \frac{R_i+x_i}{1-[\varepsilon_{i+1}] \frac{R_i+x_i}{h-x_i}} - x_i. \quad (10)$$

Протяженность последнего расчетного участка (при выходе на горизонтальный участок с радиусом, равным бесконечности) может определяться различным путем, например, из условия сохранения на этом участке радиуса кривизны, полученного на предпоследнем расчетном участке.

#### Выводы:

1. Предложена усовершенствованная физическая модель процесса разгиба слитка на криволинейных МНЛЗ, которая позволяет более точно отразить взаимодействие элементов физической модели и, тем самым, повысить точность и надежность результатов моделирования.

2. Разработан алгоритм расчета оптимальной траектории технологической оси криволинейной МНЛЗ с использованием усовершенствованной физической модели процесса разгиба слитка на криволинейной МНЛЗ.

#### Список литературы

1. Полещук В.М., Бровкин В.Л., Мухенков Ю.А. Анализ физических моделей процесса разгиба слитка в криволинейных МНЛЗ. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014, № 1. С. 45–51.
2. Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Парфенов Е.П., Юровский Н.А., Авдонин В.Ю. *Машины непрерывного литья заготовок*. Казань: Марат, 2003. 319 с.
3. Смирнов А.Н., Гридин С.В., Белобров Ю.Н., Цупрун А.Ю., Сис' Ю.В., Пильгаев В.М. Расчет параметров загиба и разгиба непрерывной заготовки для МНЛЗ различной конструкции. *Металл и литье Украины*. № 12, 2002. С. 7–10.
4. Бровман М.Я., Суринов Е.В., Грузин В.Г., Целиков А.А., Евтеев Д.П. *Энергосиловые параметры установок непрерывной разливки металлов*. М.: Металлургия. 1969. 280 с.
5. Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. *Машины непрерывного литья слывовых заготовок*. М.: Металлургия. 1991. 271 с.
6. Гельфенбейн Е.Ю., Карлинский С.Е., Нисковских В.М., Химич Г.Л. Установка непрерывной разливки металла. *Авторское свидетельство № 349238*. Оpubl. 05.05.74. *Бюллетень № 7*.
7. Полещук В.М., Бровкин В.Л. Деформированное состояние непрерывного слитка с жидкой сердцевиной на криволинейных МНЛЗ. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сборник научных трудов*. Выпуск 30. 2016. С. 216–225.
8. Полещук В.М., Бровкин В.Л., Лазич Л., Варга А., Кизек Я. Разработка компактных машин непрерывного литья заготовок. *New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: A collective monograph*. Series: Monografie, Nr 56. Czestochowa. 2016. S. 112–115.
9. Бровман М.Я. *Совмещенные процессы непрерывного литья и прокатки*. Саарбрюккен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 626 с.
10. Скребцов А.М., Федосов А.В., Пашук Д.В., Качиков А.С. О формировании поперечных трещин на поверхности непрерывнолитых заготовок, отливается из перитектических марок сталей. *Вестник Приазовского государственного*

*технического университета. Серия: Технические науки*. Вып. 21. 2015. С. 59–68.

11. Долматова О.Л., Столяров А.М. Анализ возможностей повышения производительности одноручевой слывовой МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком. *Теория и технология металлургического производства*. № 2 (19). 2016. С. 18–22.
12. Сотников А.Л., Мироненко Л.П., Руссиян С.А., Ильченко Д.В. Разработка принципов выставки оборудования сортовой МНЛЗ. *Вестник ДонНТУ*. № 1 (11). 2018. С. 3–11.

#### References (transliterated)

1. Poleshchuk V.M., Brovkin V.L., Mushenkov Yu.A. Analiz fizicheskikh modeley protsessa razgiba slitka v krivolineynykh MNLZ. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2014, No 1. P. 45–51.
2. Bulanov L.V., Korzunin L.G., Parfenov E.P., Yurovskiy N.A., Avdonin V.Yu. *Mashiny nepreryvnogo lit'ya zagotovok*. Kazan': Marat, 2003. 319 p.
3. Smirnov A.N., Gridin S.V., Belobrov Yu.N., Tsuprun A.Yu., Sis' Yu.V., Pil'gaev V.M. Raschet parametrov zagiba i razgiba nepreryvnolitoi zagotovki dlya MNLZ razlichnoy konstruktssii. *Metall i lit'e Ukrainy*. No 12, 2002. P. 7–10.
4. Brovman M.Ya., Surin E.V., Gruzin V.G., Tselikov A.A., Evteev D.P. *Energosilovye parametry ustanovok nepreryvnoy razlivki metallov*. Moscow: Metallurgiya. 1969. 280 p.
5. Niskovskikh V.M., Karlinskiy S.E., Berenov A.D. *Mashiny nepreryvnogo lit'ya slyabovykh zagotovok*. Moscow: Metallurgiya. 1991. 271 p.
6. Gel'fenbeyn E.Yu., Karlinskiy S.E., Niskovskikh V.M., Khimich G.L. *Ustanovka nepreryvnoy razlivki metalla*. Avtorskoe svidetel'stvo No 349238. Opubl. 05.05.74. *Byulleten' No 7*.
7. Poleshchuk V.M., Brovkin V.L. Deformirovannoe sostoyanie nepreryvnogo slitka s zhidkoy serdtsevinoy na krivolineynykh MNLZ. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoy metallurgii: sbornik nauchnykh trudov*. Vypusk 30. 2016. P. 216–225.
8. Poleshchuk V.M., Brovkin V.L., Lazich L., Varga A., Kizek Ya. *Razrabotka kompaktnykh mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok*. New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: A collective monograph. Series: Monografie, Nr 56. Czestochowa. 2016. P. 112–115.
9. Brovman M.Ya. *Sovmeshchennye protsessy nepreryvnogo lit'ya i prokatki*. Saarbrücken (Germaniya): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 626 p.
10. Skrebtsov A.M., Fedosov A.V., Pashchuk D.V., Kachikov A.S. O formirovani poperechnykh treshchin na poverkhnosti nepreryvnolitykh zagotovok, otliwaemykh iz peritekticheskikh marok staley. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Seriya: Tekhnicheskie nauki. Vyp. 21. 2015. P. 59–68.
11. Dolmatova O.L., Stolyarov A.M. Analiz vozmozhnostey povysheniya proizvoditel'nosti odnoruch'evoy slyabovoy MNLZ krivolineynogo tipa s vertikal'nym uchastkom. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. No 2 (19). 2016. P. 18–22.
12. Sotnikov A.L., Mironenko L.P., Russiyan S.A., Il'chenko D.V. *Razrabotka printsipov vystavki oborudovaniya sortovoy MNLZ*. *Vestnik DonNTU*. No 1 (11). 2018. P. 3–11.

Поступила (received) 10.11.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Полещук Валентин Михайлович (Полещук Валентин Михайлович, Polyeshchuk Valentyn Mikhaylovich)** – кандидат технічних наук, Асоціація наукових установ гірничо–металургійного комплексу України, виконавчий директор; м. Дніпро, Україна; e-mail: apol46503@gmail.com

**Бровкін Володимир Леонідович (Бровкін Владимир Леонидович, Brovkin Volodymyr Leonidovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, механіко-машинобудівний факультет, доцент кафедри екології, теплотехніки і охорони праці; м. Дніпро, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2925-7091>; e-mail: brovkinvolodymyr@gmail.com